基于DSSAT CERES-Wheat 模型的未来40年冬小麦最适播期分析

胡亚南[1*]，梁 驹[2]，梁社芳[3]，李世娟[1]，诸叶平[1]，鄂 越[1]

（1. 中国农业科学院农业信息研究所/农业农村部信息服务技术重点实验室，北京 100081；
2. 英国埃克塞特大学 工程、数学与物理科学学院，埃克塞特，EX4 4QF 英国；
3. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所/农业农村部农业遥感重点实验室，北京 100081）

摘 要： 在适播期内播种是促进小麦高产稳产的关键管理技术。为应对未来气候变化带来的不利影响，提高小麦高产优质主产区的冬小麦产量，本研究选取黄淮海和江淮地区作为研究区，并在研究区内选择3个代表站点，利用DSSAT CERES-Wheat模型在基准时段和未来40年分别开展了4种典型浓度路径的温室气体排放气候情景（RCPs）、51个播期处理的模型模拟试验，以明确未来冬小麦生育期内气候要素和最适播期变化特征，定量分析采用最适播期管理措施对冬小麦的增产效应。分析试验结果表明：未来冬小麦生育期内气候特征呈现暖干化的趋势；冬小麦生育期天数随温度升高而缩短，缩短天数在研究区地理空间上自北向南递增；最适播期随温度升高而推迟，在各时段、各情景下均随纬度减小而推迟；相对于基准时段，3个站点2030s时段的最适播期推迟最大天数分别自北向南递增5 d、8 d和13 d，2050s时段最适播期较2030s时段有不同程度的推迟，且各站点以2050s时段RCP8.5情景下的推迟天数最多；采取最适播期播种的管理措施，在3个站点均有不同程度的增产效应，黄淮海北片的增产效应最小，黄淮海南片和江淮地区增产幅度相对较高，集中在2%～4%之间。因此，未来黄淮海和江淮地区可采取推迟播期、选择适播期的管理措施来应对气候变暖情况，提高冬小麦产量。

关键词： 冬小麦；最适播期；气候变化；RCPs；作物模型；黄淮海；江淮

中图分类号： P467;S162.5　　**文献标志码：** A　　**文章编号：** 202104-SA005

引用格式：胡亚南, 梁驹, 梁社芳, 李世娟, 诸叶平, 鄂越. 基于DSSAT CERES-Wheat模型的未来40年冬小麦最适播期分析[J]. 智慧农业(中英文), 2021, 3(2): 68-76.

HU Yanan, LIANG Ju, LIANG Shefang, LI Shijuan, ZHU Yeping, E Yue. Optimum sowing date of winter wheat in next 40 years based on DSSAT-CERES-Wheat model[J]. Smart Agriculture, 2021, 3(2): 68-76. (in Chinese with English abstract)

1 引 言

小麦是世界上广泛种植的粮食作物之一。在中国，小麦不仅是主要口粮作物之一，还是重要的商品粮和战略储备粮，在国家粮食安全中地位突出[1,2]。随着小麦生产区域格局的演变，黄淮海和江淮冬麦区作为中国小麦主产区和优势区，其重要性更加突出[2-4]，亦逐渐成为中国优质小麦产区[5]。统计资料显示，2014年，黄淮海和江淮冬麦区冬小麦总产量和种植面积分别占全国的

收稿日期：2021-04-28　修订日期：2021-06-22

基金项目：国家重点研发计划（2017YFD0300200）；中央级公益性科研院所基本科研业务费专项（Y2021XK09）；中国农业科学院科技创新工程项目（CAAS-ASTIP-2016-AII）

*通讯作者：胡亚南（1983—），女，博士，副研究员，研究方向为作物模型模拟。电话：010-82109348。E-mail：huyanan@caas.cn。

88%和83%[6]，在中国小麦生产中有着重要地位。随着工业革命的发展，1986—2005年全球地表平均气温较百年前上升0.61℃[7]。气候变化和气象灾害放缓了农业生产力提升速率[8,9]，使粮食作物生产面临着应对人口增长和保障粮食安全的双重难题[10]，促使气候变化对作物的影响研究成为焦点，而气候变化对小麦的影响研究是该研究领域工作最全面的方向之一[11]。

调整播期是被全球广泛采用的应对气候变化的有效措施之一。Olesen等[12]研究认为，过去数十年间欧洲农民通过改变种植时间来主动适应气候变化。Ruiz-Ramos等[13]利用作物模型对西班牙的单个小麦种植点开展多种适应措施的模拟研究，结果表明采取提前播期的单一适应措施就能具有较高的适应潜力。在澳大利亚，小麦种植借助提早播种适应措施即可实现产量增加[14]。而在中国，过去60年有利于小麦生长的适应措施则为推迟播期[15]。由此可见，适宜的小麦播期调整方式在世界各地差异明显。另外，已有研究表明，温度升高使得小麦生育期缩短和减产[16]。冬小麦适期播种可促进小麦全生育期生长发育和保证其壮苗，并为高产稳产奠定基础[15,17]。冬前温度升高导致冬小麦冬前旺长，易发生麦田受寒而影响产量[18]，选择适宜的播期可以规避受气象灾害影响的风险[14,19]。

前人对适宜播期的研究方法主要基于大田试验、气象统计分析和作物模型模拟。田间试验研究因受试验量大和试验周期长的影响，多基于1—2年试验开展研究[18,20]。根据小麦与气象要素之间的关系，有研究者针对历史时期长时间序列的气象观测数据进行统计，推算适宜播期[15,21]。作物模型是气候变化影响评估研究的重要工具[22]，通过模型模拟过去30年作物生长发育、筛选适宜的适应措施[13,23,24]。作物模型因可有效规避田间试验和统计分析等方法的不足，应用于分析不同播期管理措施与产量的响应关系研究。

本研究旨在通过筛选作物最适播期的管理措施，应对未来气候变化带来的不利影响、提高黄淮海、江淮冬小麦主产区的产量。已有研究工作多集中于关注历史时期气候变化条件下的小麦适宜播种期水平[15,23,24]。考虑未来多种气候情景，确定未来气候变化平均态水平下的小麦最适播期研究还较为缺乏。本研究工作将利用农业技术转移决策支持系统（Decision Support System for Agrotechnology Transfer，DSSAT）小麦（DSSAT-CERES-Wheat）模型，模拟筛选不同典型浓度路径的温室气体排放气候情景（Representative Concentration Pathways，RCPs）下未来40年（2021—2060年）黄淮海和江淮冬麦区高产冬小麦最适播期，为该地区冬小麦高产稳产提供理论依据和科学参考。

2 数据与方法

2.1 研究区及数据来源

本研究选取3个分别隶属于黄淮海北片、黄淮海南片和江淮三大冬小麦种植区的冬小麦农业气象试验站，即河北定州（HBDZ）、河南郑州（HNZZ）和湖北麻城（HBMC）为研究站点。三者的地理和气候差异明显，且具有模型输入所需的完整田间试验数据（图1）。

注：基于自然资源部标准地图服务网站GS(2020)4632号标准地图制作，底图边界无修改。“★”为代表站点位置

图1 研究区站点分布

Fig.1 Locations of study stations

研究站点历史气象数据来自于中国气象科学数据共享网（http://cdc.nmic.cn/home.do），包括2005—2009年间逐日的最高气温、最低气温、降水、日照时数等。太阳辐射值由日照时数推算而得[25]。研究站点同期的冬小麦田间试验数据也

来自于中国气象科学数据共享网，包括作物品种、关键生育期、产量及其构成和农艺管理措施。研究区农业气象站点的农田管理措施基本与当地农民的管理措施相同。土壤质地、有机碳、容重、田间持水量等属性数据来源于国际应用系统分析研究所（International Institute of Applied System Analysis，IIASA）构建的1:100万空间土壤数据集（The Harmonized World Soil Database，HWSD）[26]。本研究采用的RCPs未来气候情景数据来自于英国气象局哈德雷中心的全球环境模型HadGEM2-ES（Hadley Centre Global Environment Model version 2 with the coupled Earth-System configuration），该模型参与了部门间影响模型比对项目（The Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project）。RCPs情景包含低温室气体排放情景（RCP2.6）、中等温室气体排放情景（RCP4.5、RCP6.0）、高温室气体排放情景（RCP8.5）。情景数据包括1984—2060年逐日最高气温、最低气温、降水和太阳辐射四个要素，并基于等距累积分布函数方法进行偏畸校正[27]。

2.2 农业技术转移决策支持系统模型（DSSAT）及其有效性验证

农业技术转移决策支持系统是被普遍使用的作物生长模拟模型之一[28]，至今已有30多年的应用历史。DSSAT模型最新的版本（v4.7.5）涵盖了42种作物的动态生长模拟模型。本研究采用DSSAT4.7.5版本（https：//dssat.net/）的小麦模型（CERES-Wheat）开展模拟分析。模型模拟所需的输入数据包括上文提及的天气日值数据、作物田间试验数据、土壤数据以及作物品种参数值。本研究对模型参数估计采用了模型中GenCalcV2.0品种参数估计模块，对各代表站点的6个品种冬小麦参数值进行调试和验证。品种参数分别为：春化作用特性参数（P1V，d）；光周期参数（P1D，%）；籽粒灌浆持续期积温（P5，℃·d）；开花期小麦单位冠层质量的籽粒数（G1，粒/g）；最佳条件下单个标准籽粒的克数（G2，mg）；非胁迫条件下成熟期单株地上部标准干物质总重（G3，g）；指叶尖逐次出现所需的积温间隔（PHINT，℃·d）。

2.3 模型适应性评价指标

通过利用各项统计指标以及模型模拟结果与实测结果的差异性对比，检验DSSAT模型模拟研究区冬小麦生育期和产量准确性。统计指标包括决定系数（R^2）、归一化均方根误差（*NRMSE*）[29]和均一性指数（*D*）[30]。具体计算公式如下：

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\left[\sum_{i=1}^{n}(S_i - O_i)^2\right]/n}}{\bar{O}} \times 100\% \tag{1}$$

$$D = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(|S_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \tag{2}$$

其中，S_i和O_i分别为模拟值与观测值；$\bar{O}$为观测平均值；n为样本数。当*NRMSE*值低于10%时，表征模拟值与观测值的相对误差小、模拟精度高；当*NRMSE*值介于10%至20%，表征模拟效果较好；当*NRMSE*值介于20%至30%，表明模拟效果一般；低于30%，则表明模拟效果差。R^2和D数值越接近1，越表明模拟值与观测值的一致性越高、模拟效果越好，反之亦然。

2.4 模型模拟试验方案与最适播期识别

利用调参验证后的DSSAT模型，模拟分析各代表站点不同气候情景下的冬小麦最适播期变化情况以及产量对播期的响应程度。模拟试验设置以三个站点的观测播期数据为基础，分别设置步长为1 d共51个播期处理的模拟试验，即每年模拟51个播期。河北定州播种日期设置为9月21日—11月10日之间；河南郑州播期日期设置为10月1日—11月20日之间；湖北麻城播种日期设置为10月11日—11月30日之间。各站点分别按照1985—2004年的基准时段（Bs）、2030s时段（2021—2040年）、2050s时段（2041—2060年）三个时段分段开展模拟运算，其中未来每个时段分别输入RCPs四个情景进行模拟。每个站

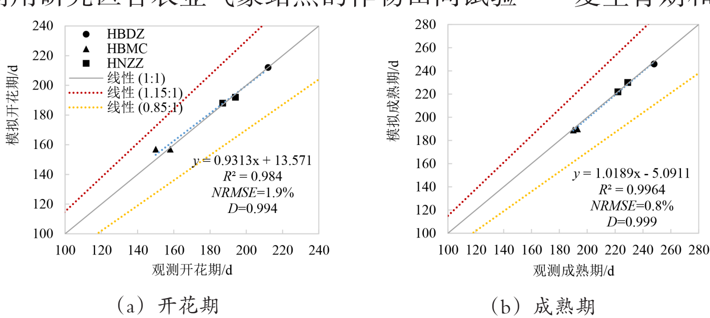
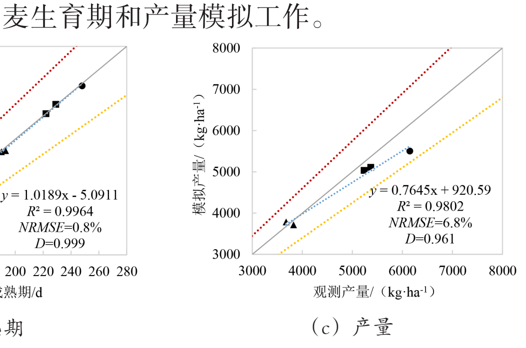
点各运行12,240次（51个播期处理×4个RCPs情景×60年）模拟试验。模拟试验的作物品种、水肥管理水平均来自各站点的观测记录，模拟试验考虑CO_2的肥效作用。

最适播期的识别通过统计不同播期处理下各时段平均产量并提取产量最高值对应的播种日期为最适播期。

3 结果与分析

3.1 DSSAT-CERES-Wheat模型参数调试与验证

利用研究区各农业气象站点的作物田间试验数据、土壤数据及田间试验同期气象站观测的天气日值数据对DSSAT-CERES-Wheat模型进行参数调试和验证。通过调试使模型模拟值尽可能接近观测值，从而实现模型本地化。模型有效性验证针对开花期（播种—开花）、成熟期（播种—成熟）和产量三方面进行对比分析（图2）。生育期模拟结果与观测值的差均小于3 d；开花期和成熟期模拟值的相对误差分别为1.9%和0.8%，*D*指数值接近1。产量的模拟值与观测值的拟合度亦较高，相对误差为小于10%（6.8%），D指数值大于0.9，较生育期模拟值略偏低。由此可知，DSSAT模型能够在研究区开展可靠的冬小麦生育期和产量模拟工作。

（a）开花期　（b）成熟期　（c）产量

图2 研究区三个代表站冬小麦开花期、成熟期和产量的观测值与DSSAT模拟值对比验证

Fig. 2 Validation of the DSSAT CERES-Wheat model simulations values on anthesis date, maturity date and yield values for winter wheat at the three stations

3.2 研究区气候要素和小麦生育期变化特征

针对模拟结果提取冬小麦生育期内不同播期处理下的平均温度、总降水量和全生育期长度等要素，分析未来2030s和2050s时段相对于基准时段的变化情况。各要素值均为多年平均值。

由表1可知，未来冬小麦生育阶段内平均温度均呈现上升趋势。其中，2030s时段的平均温度上升幅度多低于1℃；2050s时段上升幅度高于2030s时段，各个RCP情景下的升温幅度均高于1℃，且河北定州站点RCP8.5情景下温度上升幅度最高达2℃以上。全生育期降水量基本均呈现减少趋势，湖北麻城站点2050s时段降水下降幅度明显高于2030s时段，其余两个站点在未来两个时段下的降水减少幅度差异不大。

冬小麦的全生育期在未来两个时期相对基准时段均表现为长度缩短，2050s时段全生育期天数缩短天数普遍大于2030s时段，且缩短的天数由北向南递增。三个站点中，湖北麻城生育期天数在未来2030s和2050s时段的差异最大，RCP8.5情景下2050s时段生育期天数比2030s少6～12 d；河北定州的生育期天数在未来两个时段的差异最小。

3.3 最适播期变化特征

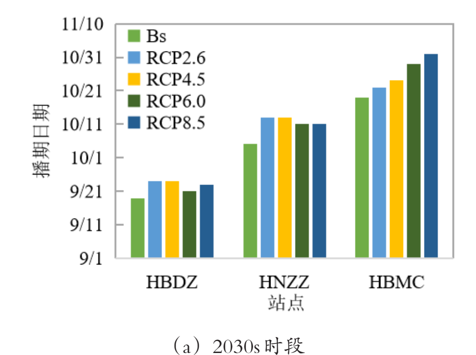
对小麦作物模型基准时段和四个RCPs情景下2030s和2050s时段的最适播期进行对比分析。由图3可知，未来2030s和2050s时段三个站点的最适播期差异较大，呈自北向南逐渐推迟趋势。

2030s时段，定州的最适播期介于9月21日至9月24日，比基准时段的最适播期9月19日晚2～5 d；郑州的最适播期介于10月11日至10

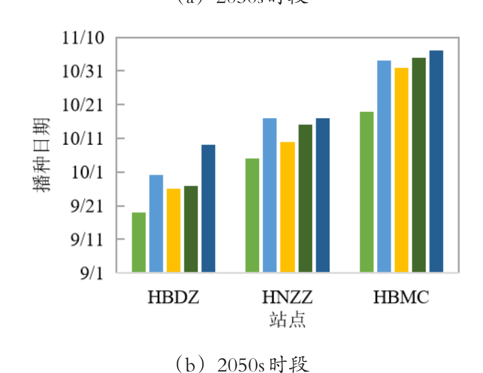
表 1　三个代表站未来2030s和2050s时段RCPs情景下全生育期长度和生育期内平均温度和总降水变化

Tabel 1　Changes of growth period length, mean temperature and total precipitation in 2030s and 2050s under RCPs scenarios at the three stations

要素	站点	2030s				2050s			
		RCP2.6	RCP4.5	RCP6.0	RCP8.5	RCP2.6	RCP4.5	RCP6.0	RCP8.5
温度/℃	定州	0.8～1.1	0.6～0.8	0.5～0.8	0.7～1.0	1.3～1.5	1.5～1.7	1.2～1.4	2.0～2.3
	郑州	0.8～1.4	0.5～0.7	0.3～0.7	0.5～0.8	1.2～1.4	1.3～1.5	1.0～1.2	1.5～1.9
	麻城	0.9～1.1	0.6～0.9	0.4～0.8	0.6～0.9	1.3～1.5	1.3～1.5	1.1～1.4	1.7～1.9
降水/mm	定州	−32.1～ −9.2	−32.0～−20.2	−35.0～−20.6	−30.8～−13.9	−26.6～−2.4	−26.5～−4.4	−35.9～−24.7	−20.7～−2.7
	郑州	−24.2～−7.7	−13.2～−0.8	−15.9～3.3	−24.1～−10.8	−18.3～0.1	−24.5～−1.5	−26.6～−9.8	−27.6～1.1
	麻城	−9.5～41.0	−8.9～25.8	24.9～85.6	−24.2～1.4	−31.6～14.0	−46.1～20.3	−49.6～−20.2	−65.4～17.3
全生育期/d	定州	−16～−13	−16～−12	−16～−12	−17～−12	−17～−13	−19～−16	−18～−15	−19～−16
	郑州	−21～−11	−17～−11	−16～−8	−16～−11	−18～−13	−19～−15	−18～−14	−21～−17
	麻城	−17～−11	−18～−9	−16～−7	−17～−11	−21～−16	−21～−16	−21～−14	−25～−22



（a）2030s时段



（b）2050s时段

图3　三个代表站点未来不同RCPs情景下2030s和2050s时段的冬小麦最适播期

Fig. 3 Winter wheat optimum sowing date under different RCPs scenarios at the three stations for 2030s and 2050s

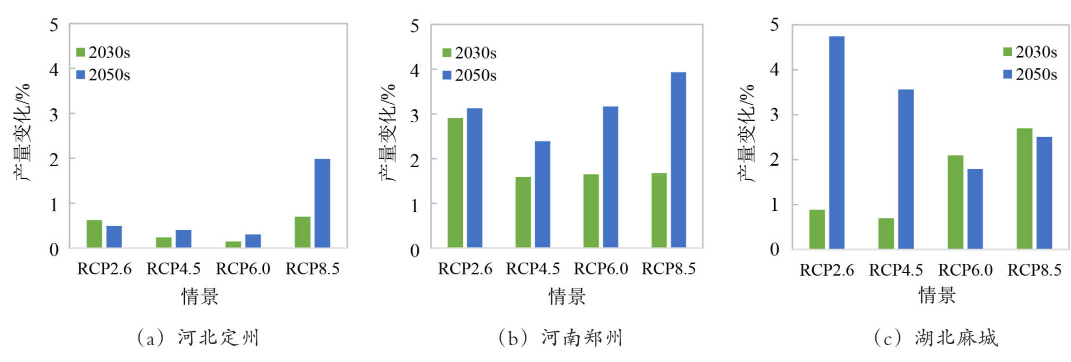
月13日，比基准时段的最适播期10月5日推迟6～8 d；麻城的最适播期介于10月22日至11月2日，比基准时段的最适播期10月19日推迟了3～13 d。其中，位于黄淮海冬麦区的定州和郑州两个站点的适播期在不同RCPs情景间差异较小，位于江淮冬麦区的麻城站适播期在各情景间差异较大。2050s时段，定州的最适播期介于9月26日至10月9日，郑州的最适播期介于10月10日至10月17日，麻城的最适播期介于11月1日至11月6日。

冬小麦的全生育期在未来两个时期相对基准时段均表现为长度缩短，2050s时段全生育期天数缩短天数普遍大于2030s时段，且缩短的天数由北向南递增。三个站点中，湖北麻城生育期天数在未来2030s和2050s时段的差异最大，RCP8.5情景下2050s时段的生育期天数比2030s时段少6～12 d；河北定州的生育期天数在未来两个时段的差异最小。

3.4　适宜播期的增产幅度

提取2030s和2050s两个时段内以基准时段最适播期为播种日期的产量模拟值，表征未来冬小麦种植不采取播期调整措施情况的产量水平。将该产量模拟值分别与2030s和2050s时段最适播期对应的模拟产量值进行对比分析，得出未来两个时段下各站点不同RCPs气候情景下采用最适播期管理措施后的增产幅度（图4）。

由图4可知，2050s时段的增产幅度基本高于2030s时段，采用最适播期后的产量增加幅度地区间差异较大。三个站点中河北定州的增产幅度最小，2030s时段的增产幅度介于0.15%～0.7%，2050s时段除RCP2.6外其余情景下的增产幅度均高于2030s时段，其中2050s时段RCP8.5情景下的增产幅度最高为1.98%。河南郑州各情



（a）河北定州 （b）河南郑州 （c）湖北麻城

图4 三个代表站未来不同RCPs情景下的冬小麦最适播期增产幅度

Fig. 4 The yield increase of winter wheat at optimum sowing date under different RCPs scenarios at the three stations

景下2050s的增产幅度分别为3.12%、2.39%、3.17%和3.93%，比2030s时段的增产幅度高0.22%～1.52%。湖北麻城站在RCP2.6和RCP4.5情景下，2050s时段的增产幅度较高，分别为4.74%和3.57%，均明显高于同一情境下的2030s时段增产幅度值；RCP6.0和RCP8.5时段出现相反的情况，但2030s和2050s时段的增产幅度差异不大，介于1.8%～2.7%之间。

4 讨 论

DSSAT作物模型在中国已经被十分广泛地应用于评估气候变化和管理措施对作物生长和产量的影响[31-33]。本研究中利用该模型评估气候变化条件下播期管理措施的改变对小麦生育期、产量的影响，进而明确小麦最适播期。常规采用的大田试验的研究方法因受气候试验条件设计和受人力物力等多方面限制，难以很好地反应出长时间序列下的气候变化对播期的影响。气象统计分析方法由于分析过程中缺少对作物实际生理特征的考虑，仅能基于大量气候数据获得长期播期的可能变化特征。作物机理模型既能考虑作物生理生态效应，又可兼顾气候变化对作物的影响评估在时间长度上的要求。

因播期改变引发小麦生育期的改变，从而产生小麦生育期内的光、热和水资源利用的差异。在不当的时间播种可能会加剧作物受到的非生物胁迫[14,24]。有研究表明冬前温度升高有利于冬小麦播期推迟，晚播可以降低早春冻害带来的不利影响[34]。Wang等[35]用DSSAT模型开展冬小麦最适播期模拟分析，结果表明过去30年（1987—2016）华北平原可有效提高小麦产量的适宜播期范围介于9月15日至10月20日之间。王夏等[20]在河南开展的大田试验发现冬小麦随着播种期的推迟，小麦全生育期缩短，获得高产的适宜播期为10月中上旬。前人在模型和田间试验角度均与本研究在黄淮南片河南郑州代表站点模拟确定基准时段的最适播期（10月5日）结果重合，并且三个代表站均呈现随时间推移冬小麦生育期内平均温度升高、生育期缩短和获得冬小麦最高产量的最适播期亦推迟的趋势与前人研究结果相同。此外，有研究利用根区水质模型模拟，表明推迟小麦播期促进氮素吸收、提高作物产量[36]。因此，选择最适播期播种可有效提高冬小麦产量、降低气候变化负面影响[37]。

据估计，相对于工业革命前，未来全球平均气温分别在RCP2.6和RCP4.5情景下的2030s和2050s时段增温1.5℃和2℃[27]。三个站点冬小麦生育期平均温度较基准时段的增温值累加基准时段相对于工业革命前的增温0.61℃，即为其相对工业革命前的增温幅度。根据表1可知，三个站点未来2030s和2050s时段冬小麦生育期的气候变化趋势特征一致，呈现暖干化趋势，平均温度升高0.5℃～2.3℃，其中在RCP2.6情景下2030s时段和RCP4.5情景下2050s时段的冬小麦生育期内平均气温分别最低增温1.41℃和1.91℃。

多有研究仅针对这两种增温幅度开展研究分析，但是由于当前全球对增温1.5℃目标未达成共识[38]，本研究为了更全面呈现未来可能的影

响，采用了四套RCPs情景对未来40年的气候数据进行模拟分析。本研究中选取三个代表站点开展最适播期的模型模拟分析，其研究结果难以全面反映整个区域最适播期变化的整体水平。为了使得研究结果更具有代表性，在研究区代表站点选择过程中虽受到作物数据资料的限制，但仍考虑了尽量扩大代表站点间空间上的差异。此外，本研究采用的RCPs情景数据来源于单一的气候模式、作物模型也采用的单一模型，因而未能考虑不同气候模式间对未来气候预测的差异以及作物模型间的模拟差异，给研究结果带来一定的不确定性[39]。这些需在进一步研究过程全面考虑以降低研究结果的不确定性。

5 结 论

本研究借助DSSAT模型，开展以中国冬小麦主产区黄淮海北片、南片和江淮为研究区的小麦最适播期研究。研究选取三个代表站点，利用代表站点农业气象站点的气候观测资料和HadGEM2-ES全球环境模型输出的RCPs气候情景资料、作物资料和土壤资料，对DSSAT CERES-Wheat模型在研究区的适用性进行验证，开展51个播期处理的播期模拟试验，评估未来不同RCPs气候情景下气候变化特征及其对冬小麦适宜播种期的影响。

冬小麦的最适播期在基准时段、2030s和2050s时段均表现为随纬度减小而推迟。三个站点的2030s和2050s时段的最适播期以郑州调整幅度最小，由基准时段的10月中旬分别推迟至10月中上旬和10月中下旬；定州最适播期由基准时段的9月中下旬推迟至9月下旬和10月上旬，麻城最适播期由基准时段的10月中下旬推迟至10月下旬和11月上旬。不同情景之间以RCP8.5情景下的推迟天数最多。各研究站点采用最适播期播种获得产量提升的差异较大，黄淮海北部的河北定州增产不明显；黄淮南部的郑州和江淮的麻城增产幅度较为显著，增产幅度集中在2%～4%之间。

参考文献：

[1] 卢布, 丁斌, 吕修涛, 等. 中国小麦优势区域布局规划研究[J]. 中国农业资源与区划, 2010, 31(2): 6-12.
LU B, DING B, LYU X, et al. Arrangement planning of Chinese wheat ascendant regions[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2010, 31(2): 6-12.

[2] 李明辉, 周玉玺, 周林, 等. 中国小麦生产区域优势度演变及驱动因素分析[J]. 中国农业资源与区划, 2015, 36(5): 7-15.
LI M, ZHOU Y, ZHOU L, et al. Comparative advantage changes of regional wheat production in China and analysis of influncing factors[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2015, 36(5): 7-15.

[3] 赵广才. 中国小麦种植区划研究(一)[J]. 麦类作物学报, 2010, 30(5): 886-895.
ZHAO G. Study on Chinese wheat planting regionalization (I)[J]. Journal of Triticeae Crops, 2010, 30(5): 886-895.

[4] ZHAO H, ZHAI X, GUO L, et al. Assessing the efficiency and sustainability of wheat production systems in different climate zones in China using emergy analysis[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 235: 724-732.

[5] 何中虎, 林作楫, 王龙俊, 等. 中国小麦品质区划的研究[J]. 中国农业科学, 2002, 35(4): 359-364.
HE Z, LIN Z, WANG L, et al. Classification on Chinese wheat regions based on quality[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2002 , 35(4): 359-364.

[6] 中华人民共和国农业部. 中国农业年鉴(2014)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2015.
Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. China agricultural statistical yearbook (2014)[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2015.

[7] CHURCH J, CLARK P, CAZENAVE A, et al, Change climate 2013: The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, United Kingdom, 2013.

[8] ORTIZ-BOBEA A, AULT T R, CARRILLO C M, et al. Anthropogenic climate change has slowed global agricultural productivity growth[J]. Nature Climate Change, 2021, 11(4): 306-312.

[9] SHI W, WANG M, LIU Y. Crop yield and production responses to climate disasters in China[J]. Science of the Total Environment, 2021, 750: ID 141147.

[10] GODFRAY H C J, PRETTY J, THOMAS S M, et al. Linking policy on climate and food[J]. Science, 2011,

331(6020): 1013-1014.
[11] HERTEL T W, DE LIMA C Z. Viewpoint: Climate impacts on agriculture: Searching for keys under the streetlight[J]. Food Policy, 2020, 95: ID 101954.
[12] OLESEN J E, TRNKA M, KERSEBAUM K C, et al. Impacts and adaptation of European crop production systems to climate change[J]. European Journal of Agronomy, 2011, 34(2): 96-112.
[13] RUIZ-RAMOS M, FERRISE R, RODRÍGUEZ A, et al. Adaptation response surfaces for managing wheat under perturbed climate and CO_2 in a Mediterranean environment[J]. Agricultural Systems, 2018, 159: 260-274.
[14] HUNT J R, LILLEY J M, TREVASKIS B, et al. Early sowing systems can boost Australian wheat yields despite recent climate change[J]. Nature Climate Change, 2019, 9(3): 244-247.
[15] 李德, 杨太明, 张学贤. 气候变暖背景下宿州冬小麦适播期的确定[J]. 中国农业气象, 2012, 33(2): 254-258.
LI D, YANG T, ZHANG X. Determination of optimum sowing date of winter wheat in Suzhou under global warming[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2012, 33(2): 254-258.
[16] TAO F, ZHANG Z, ZHANG S, et al. Heat stress impacts on wheat growth and yield were reduced in the Huang-Huai-Hai Plain of China in the past three decades[J]. European Journal of Agronomy, 2015, 71: 44-52.
[17] 吴乾慧, 张勃, 马彬, 等. 气候变暖对黄土高原冬小麦种植区的影响[J]. 生态环境学报, 2017, 26(3): 429-436.
WU Q, ZHANG B, MA B, et al. Impact of climate warming on winter wheat planting in the Loess Plateau[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2017, 26 (3): 429-436.
[18] 刘万代, 陈现勇, 尹钧, 等. 播期和密度对冬小麦豫麦49-198群体性状和产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2009, 29(3): 464-469.
LIU W, CHEN X, YIN J, et al. Effect of sowing date and planting density on population trait and grain yield of winter wheat cultivar Yumai 49-198[J]. Journal of Triticeae Crops, 2009, 29(3): 464-469.
[19] SANDHU S S, KAUR P, GILL K K, et al. The effect of recent climate shifts on optimal sowing windows for wheat in Punjab, India[J]. Journal of Water and Climate Change, 2020, 11(4): 1177-1190.
[20] 王夏, 胡新, 孙忠富, 等. 不同播期和播量对小麦群体性状和产量的影响[J]. 中国农学通报, 2011, 27(21): 170-176.
WANG X, HU X, SUN Z, et al. Effect of different sowing dates and planting density on group characters and yield of wheat[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(21): 170-176
[21] MOURTZINIS S, SPECHT J E, CONLEY S P. Defining optimal soybean sowing dates across the US[J]. Scientific Reports, 2019, 9(1): ID 2800.
[22] CHENU K, PORTER J R, MARTRE P, et al. Contribution of crop models to adaptation in wheat[J]. Trends in Plant Science, 2017, 22(6): 472-490.
[23] 江晓东, 张涛, 陈佳鑫, 等. 基于WOFOST模型的苏南地区春小麦种植适应性分析[J]. 南方农业学报, 2020, 51(2): 335-341.
JIANG X, ZHANG T, CHEN J, et al. Adaptability of spring wheat planting in the south of Jiangsu based on WOFOST model[J]. Journal of Southern Agriculture, 2020, 51(2): 335-341
[24] XIN Y, TAO F. Optimizing genotype-environment-management interactions to enhance productivity and eco-efficiency for wheat-maize rotation in the North China Plain[J]. Science of The Total Environment, 2019, 654: 480-492.
[25] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements-FAO irrigation and drainage paper 56[M]. Roma: FAO-Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998.
[26] FAO/IIASA/ISRIC/ISSCAS/JRC. Harmonized world soil database (version 1.1) [S]. FAO, Rome: Italy and IIASA, Laxenburg, Austria, 2009.
[27] SU B, HUANG J, FISCHER T, et al. Drought losses in China might double between the 1.5 degrees C and 2.0 degrees C warming[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of The United States of America, 2018, 115(42): 10600-10605.
[28] JONES J W, HOOGENBOOM G, PORTER C H, et al. DSSAT cropping system model[J]. European Journal of Agronomy, 2003, 18: 235-265.
[29] WALLACH D, GOFFINET B. Mean squared error of prediction as a criterion for evaluating and comparing system models[J]. Ecological Modelling, 1989, 44(3): 299-306.
[30] WILLMOTT C J. Some comments on the evaluation of model performance[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1982, 63(11): 1309-1313.
[31] 孙茹, 韩雪, 潘婕, 等. 全球1.5℃和2.0℃升温对中国小麦产量的影响研究[J]. 气候变化研究进展, 2018, 14(6): 573-582.
SUN R, HAN X, PAN J, et al. The impact of 1.5℃ and 2.0℃ global warming on wheat production in China[J]. Climate Change Research, 2018, 14(6): 573-582.
[32] YANG X, TIAN Z, SUN L, et al. The impacts of increased heat stress events on wheat yield under climate change in China[J]. Climatic Change, 2017, 140(3):

605-620.
[33] ASSENG S, MARTRE P, MAIORANO A, et al. Climate change impact and adaptation for wheat protein[J]. Global Change Biology, 2019, 25(1): 155-173.
[34] SUN H, ZHANG X, CHEN S, et al. Effects of harvest and sowing time on the performance of the rotation of winter wheat-summer maize in the North China Plain[J]. Industrial Crops and Products, 2007, 25(3): 239-247.
[35] WANG C, FENG L, WU L, et al. Assessment of genotypes and management strategies to improve resilience of winter wheat production[J]. Sustainability, 2020, 12(4): 1-21.
[36] DING D, FENG H, ZHAO Y, et al. Modifying winter wheat sowing date as an adaptation to climate change on the loess plateau[J]. Agronomy Journal, 2016, 108(1): 53-63.
[37] TAO F, ZHANG Z, XIAO D, et al. Responses of wheat growth and yield to climate change in different climate zones of China, 1981—2009[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2014, 189-190: 91-104.
[38] DUAN H, ZHOU S, JIANG K, et al. Assessing China's efforts to pursue the 1.5°C warming limit[J]. Science, 2021, 372(6540): 378-385.
[39] XIONG W, ASSENG S, HOOGENBOOM G, et al. Different uncertainty distribution between high and low latitudes in modelling warming impacts on wheat[J]. Nature Food, 2019, 1(1): 63-69.

Optimum Sowing Date of Winter Wheat in Next 40 Years Based on DSSAT-CERES-Wheat Model

HU Yanan[1*], LIANG Ju[2], LIANG Shefang[3], LI Shijuan[1], ZHU Yeping[1], E Yue[1]

(1. *Agricultural Information Institute*, *Chinese Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Agri-information Service Technology*, *Ministry of Agriculture and Rural Affairs*, *Beijing* 100081, *China*; 2. *College of Engineering*, *Mathematics and Physical Sciences*, *University of Exeter*, *Exeter EX*4 4*QF*, *UK*; 3. *Key Laboratory of Agricultural Remote Sensing*, *Ministry of Agriculture and Rural Affairs/Institute of Agricultural Resources and Regional Planning*, *Chinese Academy of Agricultural Sciences*, *Beijing* 100081, *China*)

Abstract: Climate change requires crop adaptation. Plantint at the suitable date is a key management technology to promote crop yield and address the impact of climate change. Wheat is one of the most important staple crops in China. Huang-Huai-Hai and Jiang-Huai regions are high-quality and high-quantity planting areas for wheat. To deal with the adverse effects of climate change and promote the winter wheat yield in Huang-Huai-Hai and Jiang-Huai regions, the optimum sowing date was identified by creating a wheat simulation with DSSAT CERES-Wheat model. The simulation experiment was designed with 51 management inputs of sowing date and 4 climate scenarios (RCPs) under baseline period (1985—2004) and 40 years in future for three representative stations in the study region. The optimum sowing data of winter wheat was corresponding to the simulation set with highest yield in each site. The characters of changes in climate factors during the growth period and the optimum sowing date among the different period were detected, and the yield increase planted at the optimum sowing date was quantified. The results showed that, in the future, the climate during winter wheat growth period showed a trend of warming and drying would shorten the growth period. The optimum sowing date would be postponed with the rise of temperature, and the decrease of latitude in all periods and under various climate scenarios. Relative to the baseline period, the maximum delay days of the optimal sowing date increased from north to south during 2030s, which were 5 days, 8 days and 13 days at the three representative stations, respectively. The optimum sowing times in 2050s were delayed in different degrees compared with that in 2030s. The largest postponed days at each station was at the RCP8.5 scenario in 2050s. Adopting the management of optimum planting date could mitigate climatic negative effects and was in varying degrees of yield increasing effect at three sites. The smallest increase occurred in Huang-Huai-Hai north region, while Huang-Huai-Hai south region and Jiang-Huai region had the relatively higher yield increasement about 2%—4%. Therefore, the present study demonstrated an effective management of optimum sowing date to promote winter wheat yield under climate change in Huang-Huai-Hai and Jiang-Huai regions.

Key words: winter wheat; optimum sowing date; climate change; RCPs; crop model; Huang-Huai-Hai; Jiang-Huai